



西北印度洋天休热液区深海橄榄岩的蚀变演化序列：岩石化学与矿物学证据

吕品洁, 李洪林, 俞 恂, 李江涛

Altered evolution sequence of abyssal peridotites from the Tianxiu hydrothermal field in the northwestern Indian Ocean: Evidence from petrochemistry and mineralogy

LYU Pinjie, LI Honglin, YU Xun, and LI Jiangtao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2025060501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西北印度洋天休热液区热液成因矿物特征与分布及其指示意义

Characteristics, distribution and implication of hydrothermal minerals in Tianxiu Hydrothermal Field, Carlsberg Ridge, northwest Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 36–45

中印度洋Edmond热液区黄铁矿中银的赋存状态和富集机制研究：来自矿物学的证据

Mode of silver occurrence in pyrite from the Edmond hydrothermal field, Central Indian Ridge: mineralogical evidence

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 84–92

大西洋中脊赤狐热液区热液产物矿物学特征及其地质意义

Mineralogical and geological significance of hydrothermal products: A case from the Chihu hydrothermal field, South Mid–Atlantic Ridge

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 46–58

洋壳蚀变过程中锂同位素行为研究进展

Behavior of Li isotopes during the alteration of oceanic crust: A review

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 93–106

大洋蛇纹岩化无机成因甲烷水合物稳定带底界模拟

Simulation of bottom boundaries of abiotic methane hydrate stability zone in some marine serpentinization areas

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 107–115

西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126–138



关注微信公众号，获得更多资讯信息

吕品洁, 李洪林, 俞恂, 等. 西北印度洋天休热液区深海橄榄岩的蚀变演化序列: 岩石化学与矿物学证据 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(4): 85-97.

LYU Pinjie, LI Honglin, YU Xun, et al. Altered evolution sequence of abyssal peridotites from the Tianxiu hydrothermal field in the northwestern Indian Ocean: Evidence from petrochemistry and mineralogy[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(4): 85-97.

西北印度洋天休热液区深海橄榄岩的蚀变演化序列: 岩石化学与矿物学证据

吕品洁¹, 李洪林², 俞恂¹, 李江涛¹

1. 同济大学海洋地质全国重点实验室, 上海 200092

2. 海底科学与划界全国重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

摘要: 热液区超基性岩的蚀变过程在控制区域地球化学循环与矿物演化方面起关键作用, 但热液区超基性岩的蚀变过程与蚀变机制目前还不清楚。本文以西北印度洋天休热液区不同位置获取的超基性岩为例, 通过镜下岩矿综合鉴定、全岩化学成分分析以及电子探针成分分析等进行了岩石化学特征、矿物学特征及其蚀变演化过程的研究。结果表明, 天休热液区超基性岩发生了严重蚀变, 主要特征组合矿物为蛇纹石 (叶蛇纹石、纤蛇纹石、利蛇纹石)、伴生磁铁矿、绿泥石、伊丁石、方解石等次生矿物。综合全岩以及矿物主量元素分析发现天休热液区超基性岩的蚀变演化过程主要分为两个阶段: (I) 橄榄石、辉石类矿物在封闭系统下经历了典型的蛇纹石化作用; (II) 橄榄石在开放氧化环境下进一步经历了伊丁石化作用。蛇纹石化过程中 Fe、Ca 大量迁移并富集于次生矿物 (如磁铁矿或碳酸盐矿物) 中, 说明原生橄榄石已经发生了较完全的蛇纹石化, 形成了高镁型蛇纹石。相比之下, 伊丁石化过程中 Fe 的富集和 Si、Mg 元素的迁移对伊丁石、铁氧化物的形成与演化起到了一定的催化作用。本研究揭示了天休热液区深海橄榄岩的两期蚀变演化过程, 为理解该热液区蚀变矿物的形成演化机制和元素的富集迁移提供了重要参考。

关键词: 深海橄榄岩; 蛇纹石化; 伊丁石化; 天休热液区

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2025060501

Altered evolution sequence of abyssal peridotites from the Tianxiu hydrothermal field in the northwestern Indian Ocean: Evidence from petrochemistry and mineralogy

LYU Pinjie¹, LI Honglin², YU Xun¹, LI Jiangtao¹

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. State Key Laboratory of Submarine Geoscience, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Abstract: The alteration of ultrabasic rocks in hydrothermal fields plays a critical role in regulating regional geochemical cycles and mineral evolution. However, the detailed processes and mechanisms governing such alteration remain poorly understood. We investigated ultrabasic rocks collected from various locations in the Tianxiu hydrothermal field in the northwestern Indian Ocean. By integrating analysis results in petrography, whole-rock geochemistry, and electron micro-probing, the petrochemical and mineralogical features were clarified and the evolution of the rock alteration was reconstruct. Results indicate that the ultrabasic rocks in the hydrothermal field had undergone extensive alteration. The dominant secondary mineral assemblage includes serpentine minerals (antigorite, chrysotile, and lizardite), accompanied by magnetite, chlorite, iddingsite, calcite, and other alteration products. The alteration history could be divided into two stages. In Stage I, olivine and pyroxene experienced typical serpentinization under relatively closed-system conditions; in Stage II, olivine subsequently underwent iddingsitization in an open ad oxidizing environment. During the serpentinization, substantial Fe and Ca were mobilized and enriched in the secondary minerals such as magnetite and carbonate, suggesting that the original olivine was completely replaced by high-Mg serpentine. In the later iddingsitization stage, Fe enrichment along with Si and Mg mobilization played a catalytic role in the formation and evolution of iddingsite

资助项目: 国家重点研发计划课题“洋壳蚀变过程成矿元素迁移转化的地生耦合研究”(2021YFF0501301)

作者简介: 吕品洁 (1999—), 女, 硕士研究生, 海洋科学专业, E-mail: lvpinjie@tongji.edu.cn

通讯作者: 李洪林 (1988—), 男, 助理研究员, 主要从事洋中脊构造岩浆过程、深海热液成矿系统及其地球物理与地球化学响应特征的研究,

E-mail: lihl@sio.org.cn

俞恂 (1988—), 男, 副教授, 主要从事洋中脊及板内玄武岩岩浆作用及其源区地幔动力学过程的研究, E-mail: yuxun@tongji.edu.cn

收稿日期: 2025-06-05; 改回日期: 2025-08-02. 周立君编辑

and associated iron oxides. These findings reveal a complex and multi-stage alteration history of deep-sea peridotites in the Tianxiu hydrothermal field and provide valuable insights into mineral transformation mechanisms and element mobility in such settings.

Key words: abyssal peridotite; serpentinization; iddingsitization; Tianxiu hydrothermal field

在慢速和超慢速扩张洋中脊, 拆离断层在洋中脊岩浆不够充足的时期发育, 并剥露下洋壳和上地幔岩石于洋底, 形成大洋核杂岩。在此过程中, 上地幔超基性岩即橄榄岩在洋壳流体的作用下普遍发生蛇纹石化, 产生蛇纹石、水镁石、磁铁矿和氢气等, 是最重要的水-岩相互作用形式之一^[1-4]。该过程不仅改变了岩石圈的物理性质和化学组成, 影响了深层物质循环和能量交换, 同时为海底微生物活动提供了必需的营养物质、能量来源与适宜生境^[5]。因此, 对海底超基性岩蚀变过程的研究具有重要的科学意义。

典型的蛇纹石化反应是将橄榄石和辉石中的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 水中的 H^+ 被还原为氢气, 反应的主要产物为蛇纹石、水镁石、磁铁矿和氢气^[4]。其中蛇纹石族矿物根据结构形态的不同可分为4种: 利蛇纹石、纤蛇纹石、叶蛇纹石、多边形蛇纹石^[6]。深海橄榄岩蛇纹石化发生的温度范围较宽, 基于蛇纹岩氧同位素研究证实深海橄榄岩蛇纹石化通常始于洋壳深部($>4\text{ km}$)的高温环境($300\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)并一直持续到正常海水温度^[7]。深海橄榄岩的蛇纹石化主要有两个途径: 当温度大于 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 辉石蚀变成滑石和透闪石, 而橄榄石保持稳定^[8]; 当温度低于 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 橄榄石蚀变成蛇纹石、磁铁矿和水镁石, 该阶段橄榄石反应速率比辉石更快^[9]。深海橄榄岩的蛇纹石化过程可以根据水岩反应过程中的流体含量划分为两个阶段: 在水岩比例较低的早期, 橄榄石蚀变形成蛇纹石和含铁水镁石; 在水岩比例较高的后期, 含铁水镁石分解形成磁铁矿和网状结构^[10]。因此, 通过对深海橄榄岩的蛇纹石化过程的研究能够反演深海岩石的蚀变环境及其经历的水岩相互作用。同时, 蛇纹石化过程深刻影响深层地球的物质循环和成矿作用, 并伴随氢气等还原性气体的释放。这些还原性气体(如氢气、甲烷)不仅可驱动非生物合成有机物, 而且为深海化能自养微生物群落提供能量, 可能与地球及其他行星的生命起源相关^[11-14]。

慢速—超慢速扩张洋脊岩浆供应不足导致洋脊两侧非对称性扩张、增生, 使得其常发育拆离断层。这些区域的洋壳结构通常不完整, 拆离断层通常会将上洋壳岩石剥离, 导致下洋壳辉长岩甚至上地幔岩石出露于海底。同时, 在拆离断层附近, 因

其良好的通道条件, 常发育海底热液喷口。随着橄榄岩向上迁移并出露至洋底, 其后续的蚀变过程受控于环境流体性质和温度条件, 形成“海水蚀变”与“热液蚀变”两种主要路径^[15-17]。“海水蚀变”是橄榄岩暴露于海水中并遭受广泛的蚀变作用, 主要为火成岩矿物向蒙脱石、黏土矿物、氢氧化物等转化^[18], 如进行伊丁石化等蚀变过程^[19]。伊丁石化是指橄榄石在低温氧化-水化条件下转变为各种深浅不一的红色至棕色蚀变产物, 即伊丁石^[19]。它并非为标准矿物, 而是由黏土矿物(如蒙脱石或高岭石)、铁氧化物(如赤铁矿、针铁矿)及少量残余橄榄石所组成的次生矿物集合体^[20]。事实上, 除非有非常明确的高温成因证据, 例如在高温岩浆中发现伊丁石被新鲜橄榄石包围或包裹在筛状辉石中^[21], 通常情况下认为伊丁石是低温条件下由氧化性流体渗入引起的橄榄岩蚀变, 在显微镜下伊丁石多沿裂隙分布^[19]。尽管蛇纹石化与伊丁石化在温度条件、氧化还原环境及产物类型上存在明显差异, 但二者在深海超基性岩的演化过程中密切相关, 常呈现出连续演化关系, 伊丁石化多发生于蛇纹石化之后的较低温、较强氧化环境中, 是其在后期氧化性流体影响下的进一步反应, 体现了岩石在不同温度-流体条件下的阶段性蚀变响应。“热液蚀变”是橄榄岩出露在热液喷口附近, 深部至浅部始终处于热液活动主导之中, 体现出连续、稳定的热液蚀变反应条件, 其蛇纹石化过程未被后期海水显著改造^[16]。这类热液蚀变过程的反应温度普遍较高(通常为 $40\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[22], 呈还原性且流体成分更为复杂, 含有丰富的金属离子、硫化物及还原性气体^[2], 显著促进了蛇纹石、水镁石、滑石、透闪石以及多种金属硫化物的形成^[18]。此外还通过释放还原性气体等促进深海化能自养微生物群落活跃^[5]。因此, 海底的热液蚀变在温度、氧化还原状态与流体成分条件上与海水蚀变存在显著差异, 直接决定了橄榄岩中矿物的反应路径及最终蚀变产物的种类^[23]。

天休热液区是位于慢速扩张洋中脊-卡尔斯伯格洋中脊典型的受拆离断层控制的超基性岩型热液系统, 该区域深海橄榄岩的共生矿物特征记录了超基性岩蛇纹石化、伊丁石化等作用的各个阶段, 其中二者的过渡过程反映了热液系统中温度、氧化还原条件及流体性质的演化, 对于揭示水-岩

相互作用的时空进程具有重要意义, 是研究深海超基性岩蚀变演化过程与元素富集和迁移的重要对象。吴雪婷^[24]对天休热液区的喷口流体气体成分分析研究可知, 高温喷口流体富含 H_2 与 CH_4 (含量分别为 3.86 mM 与 0.16 mM, 计算得到的端元含量值分别为 48.9 mM 与 0.71 mM), 均高于其他典型镁铁型热液区流体。前人曾对该热液区的橄榄岩进行蚀变过程的元素迁移特征研究^[25], 以及通过对该区玄武岩的研究指示深部岩浆来源及演化过程^[26-27]等, 但对该地区超基性岩蚀变过程研究相对较少, 且当前研究主要集中于单一阶段或单一矿物及其地球化学指标的描述, 缺少系统构建蛇纹石化至伊丁石化的连续演化模型^[20,25]。本文拟对天休热液区采集的深海橄榄岩的蚀变反应及演化序列进行系统研究, 通过全岩主量元素、矿物主量元素分析和光学显微镜下的薄片观察等, 探究深海橄榄岩在不同蚀变作用条件下的矿物共伴生组合特征、全岩化学成分变化规律、主要蚀变矿物的化学成分特点以及岩相学和地球化学之间的内在联系等, 揭示该热液区深海橄榄岩的蚀变演化特征和机制。

1 研究区概况

研究样品采集于西北印度洋卡尔斯伯格脊的天休热液区(图 1)。卡尔斯伯格脊属于慢速扩张洋脊, 扩张速率为 22~32 mm/a^[28], 其轴部地形特征与大西洋洋中脊等慢速扩张洋脊相似, 岩浆供给弱, 呈现明显的轴部裂谷特征。沿整个洋脊的轴部裂谷, 水深变化频繁, 代表着沿脊新生火山活动的不均一性和区域性。中国 2012 年开启了卡尔斯伯格脊多金属硫化物资源与环境调查, 在该洋脊发现了天休、卧蚕和大禧等活动热液区, 并取得了一系列重要研究成果^[29-31]。天休热液区由中国大洋 33 航次于 2015 年首次发现, 位于卡尔斯伯格脊宝船断裂以西的 3.8°N、63.8°E 附近, 其所在脊段水深 2000~4600 m, 轴部裂谷沿 130°方向延伸, 是一段构造作用较强、岩浆作用较弱的非对称扩张脊段。天休热液区位于拆离断层终端带, 是典型受拆离断层控制的超镁铁岩型热液区^[28]。

2 材料与方法

2.1 样品采集

大洋 72 航次(2022 年)搭载“蛟龙号”载人潜水

器在天休热液区(3°41'~3°42'N、65°50'E)利用机械手抓取了不同构造位置的海底表面岩石样品, 采样位置底层水温度均为 1.9~2.0 °C^[24]。本文选取其中 3 件表面覆盖红色氧化壳的典型超基性岩样品(图 2)进行测试分析。这些样品均位于天休热液区内, 构造产出于拆离断层终端破碎带, 其中 JL213U 样品采样位置最近, 距高温热液喷口群(最高温达 304 °C, pH 值约 6.4)西北向约 210 m, 且采样位置东北向约 80 m 处可见处于热液喷发后期的低温弥散区域; JL215U 距离最远, 位于高温热液喷口西北向约 500 m; 而 JL214U 位于高温热液喷口东向约 340 m^[24]。样品测试均在同济大学海洋地质全国重点实验室完成。

2.2 岩石手标本及薄片观察描述

在手标本观察描述和照相之后, 选择样品中具有代表性特征的区域切片, 磨制岩石薄片和电子探针片以用于光学显微镜观察、扫描电镜和微区原位地球化学分析。主要工作为利用偏光显微镜对岩石薄片进行岩相学观察和描述, 并对典型特征和重要现象进行拍照, 显微镜型号为 Leica DM4500P 型光学显微镜。

2.3 电子探针元素分析

仪器为日本电子公司的型号为 JEOL JXA-

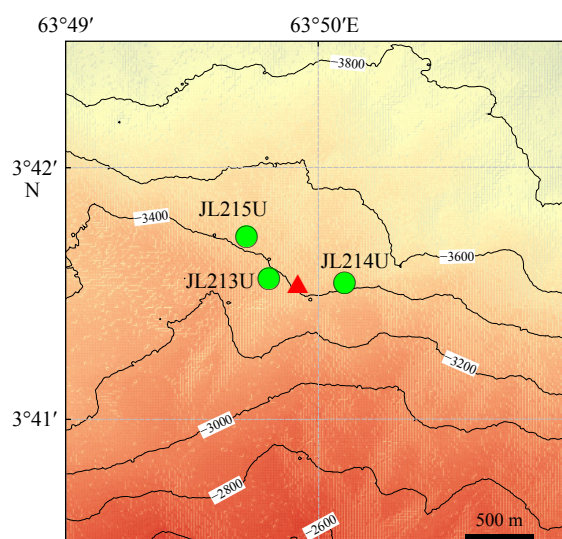


图 1 研究区地形图及采样位置示意图

绿色实心圆为采样点位置, 红色三角形为高温热液喷口。

Fig.1 The topographic map of the research area and the schematic diagram of the sampling sites

Green solid dots are sampling sites, the red triangle shows the high-temperature hydrothermal vent.

8230 电子探针显微分析仪。定量分析条件: 加速电压为 15 kV, 电子束流为 10 nA, 电子束斑直径 0~200 μm 。所有元素的峰位测试时间为 10 s, 上下背景的测试时间为峰位的一半。采用天然和人工合成的矿物或者氧化物作为标样, 数据处理采用 ZAF 校正方法。面分析条件: 加速电压为 15 kV, 电子束流为 50~100 nA, 电子束斑直径 0~1 μm , 驻留时间 10 ms; 能谱分析采用了牛津公司 X-MaxN 大面积 SDD 能谱仪, 分析条件是加速电压 15 kV, 电子束流 10 nA。

2.4 扫描电子显微镜分析

仪器为发射扫描电子显微镜(FE-SEMTESCAN Mira3), 样品为不平岩块, 样品做喷金处理后再对矿物表面形貌进行观察。分析条件: 电压为 5 kV, 工作距离为 15 mm。同时应用牛津公司 Ultim Max40 EDS 能谱仪对各种矿物微区化学成分进行分析并定性, 分析的加速电压为 5 kV。

2.5 全岩主量元素分析

测试仪器采用 PANalytical AXIOS-Advanced 型 X 射线荧光光谱仪。具体实验方法如下: 将 0.7000 ± 0.0010 g 样品粉末与 7.0000 ± 0.0010 g 荧光剂粉末均匀地混合于干净的瓷坩埚中。然后, 将其倒入铂金坩埚, 并向其中加入 2 滴 0.4 g/mL 的 LiBr 和 2 滴 30% 的 H_2O_2 。将铂金坩埚放在电熔炉内 1050 $^\circ\text{C}$ 煅烧, 待样品完全熔融后, 用坩埚钳将样品快速倒在铂金托盘上。冷却后形成的熔片样品进行测试, 测试过程中, 每 3 个样品进行一次重复样测试, 并内插 GSR01、GSR03、GSR04 和 GSR05 标样, 以控制测试结果的质量。重复样的测试结果显示, 主要元素 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 MnO 、 MgO 、 CaO 和 Na_2O 的相对误差均小于 5%。此外, 采用 $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ 指

代铁的氧化物, 不具体区分三价铁和二价铁的氧化物。

对全岩样品进行烧失量(LOI)测试。将 0.2 g 样品粉末放在干净的坩埚中, 用分析天平(A analytical Balance MS105DU)称量煅烧前坩埚和样品的总质量(M_1)。然后, 将装有样品的坩埚放在马弗炉中 600 $^\circ\text{C}$ 煅烧 2 h。待样品冷却至室温后, 用相同的分析天平称量煅烧后坩埚和样品的总质量(M_2)。烧失量由两个质量之差计算得来。

3 结果

3.1 手标本岩相学特征

从海底采集的深海橄榄岩样品主要由方辉橄榄岩组成, 尺寸大小不一, 具有块状构造和粒状结构, 主要为中至细粒的黑色和绿色岩石(图 2), 表面普遍发育一层红色的氧化物层, 厚度不等。样品总体蚀变严重, 少见新鲜的原生矿物残余, 主要的蚀变产物为蛇纹石、磁铁矿等。橄榄岩长期暴露在海水的过程中, 不可避免地发生一系列的蚀变作用, 从宏观特征来看, 其表层的质地与颜色等与内部具有显著的差别(图 2)。因此, 我们从橄榄岩表层与内层分别取样进行显微结构的观察与描述。

3.2 蚀变橄榄岩的矿物学特征

深海橄榄岩的原生矿物组成通常由橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和尖晶石组成^[4]。根据光学显微镜鉴定, 本文研究的样品中新鲜橄榄石和辉石的含量很低, 几乎已完全蚀变成蛇纹石, 残余的原生矿物颗粒以尖晶石为主。

典型的洋中脊蛇纹岩主要是由蛇纹石类矿物、磁铁矿、滑石、水镁石、透闪石组成^[7]。在橄榄岩的蚀变过程中, 原生矿物尖晶石几乎不会被流体蚀



图 2 采集自天休热液区的超基性岩样品(DY72 航次)

JL213U 表面呈现浅绿色-黄褐色-红色, JL214U 表面呈现红色-黑色, JL215U 表面呈现黑色-深绿色-红色-黄褐色。

Fig.2 The ultrabasic rock samples collected from the hydrothermal zone of Tianxiu (The DY72 voyage)

The surface of JL213U appears light green-yellowish brown-red. The surface of JL214U appears red-black. The surface of JL215U appears black-dark green-red-yellowish brown.

变, 常呈蠕虫状结构在大多数样品中保存完好(图 3a)。在 JL215U 表层中发现橄榄石分解为黏土矿物组成的混合物即伊丁石, 显微镜下多沿裂隙分布(图 3b)。在三块岩石中均观察到橄榄石蛇纹石化形成网格状结构(图 3c), 初期发育的裂理结构被破坏, 几乎没有新鲜的橄榄石残留, 磁铁矿伴生在形成的裂隙中。辉石则会被蛇纹石完全取代但保持原有结构形态(图 3d), 也称绢石。由此可以推断天体区橄榄岩的原生矿物主要由橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和少量尖晶石组成。

蚀变过程中的脉体类型主要包括蛇纹石、磁铁矿和方解石脉体。蛇纹石脉体最为常见, 早期蛇纹石脉体多沿着橄榄石蚀变形成的网脉分布, 随着蛇纹石化程度增加在网脉结构中也会形成由磁铁矿析出所形成的金属脉体(图 3c), 后期流体进入岩石

中反应沉淀, 在裂隙处形成方解石脉体(图 3d)。

3.3 扫描电镜分析结果

扫描电镜可以用来观察蛇纹石族矿物不同种类的形态并进行分类, 从而确定不同结构的蛇纹石类型。Andreani 等^[32]提出蛇纹石呈现出 4 种主要结构类型: 利蛇纹石(平面状结构)、纤蛇纹石(圆柱状结构)、多边形蛇纹石(带有多边形截面的管状结构)和叶蛇纹石(调变结构)。

扫描电镜结果显示本研究样品中可发现 4 种不同结构类型的蛇纹石。样品中最为常见的蛇纹石种类为纤蛇纹石和叶蛇纹石。利蛇纹石呈平板状纹层(图 4a), 厚度不一, 约 1~2 μm 或更薄。但当利蛇纹石发生重结晶时部分会形成纤蛇纹石, 如网状结构的蛇纹石发生重结晶形成纤蛇纹石。纤蛇

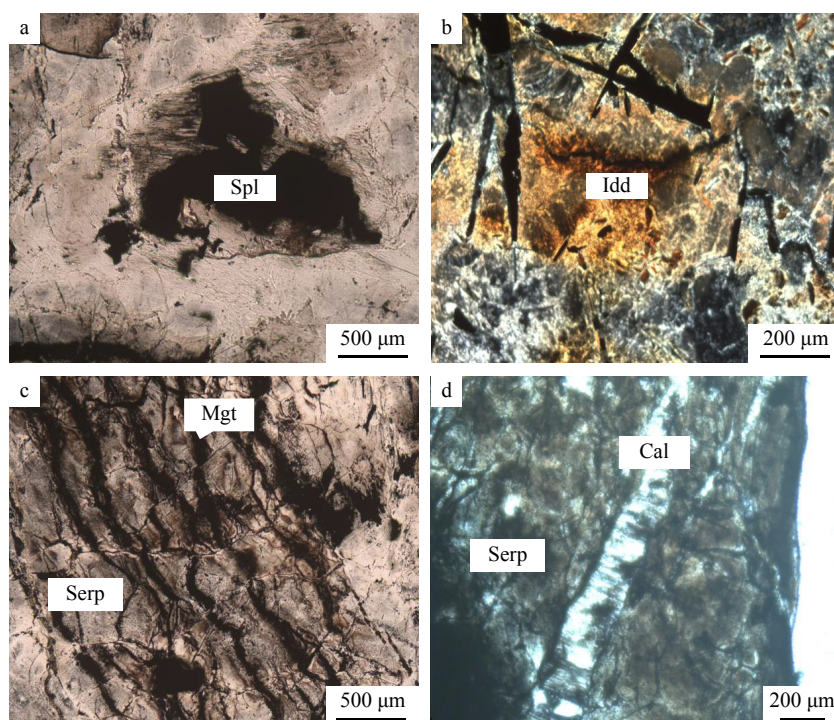


图 3 蚀变橄榄岩中原生矿物及次生矿物的光学显微镜照片

a: JL214U 中单偏光下照片, 尖晶石单偏光下呈深红褐色, 正交镜下全消光, 其矿物边界不够平滑, 常呈蠕虫状与斜方辉石(图中已完全被蛇纹石取代)伴生; b: JL215U 表层中正交偏光下照片, 伊丁石正交偏光下; c: JL214U 中单偏光下照片, 橄榄石蛇纹石化发育的裂理结构, 磁铁矿充填在形成的裂隙中; d: JL214U 中单偏光下照片, 辉石蛇纹石化发育的裂隙被后期流体充填形成方解石脉。

Serp: 蛇纹石; Spl: 尖晶石; Idd: 伊丁石; Mgt: 磁铁矿; Cal: 方解石。

Fig.3 Optical microscope images of original and secondary minerals in altered peridotite

a: A single polarized light photo of JL214U. Spinel appears dark reddish-brown under single polarized light and is completely extinguished under orthogonal microscopy. Its mineral boundaries are slightly rough and often appear in a vermicular form, coexisting with clinopyroxene (which has been completely replaced by serpentine in the picture); b: Photos of the surface layer of JL215U and iddingsite under orthogonally polarized light; c: In JL214U, under single polarized light, the cleavage structure of olivine serpentinized development, magnetite filled in the formed fissures; d: In JL214U, under single polarized light, the fissure of pyroxene serpentinization development was filled by later fluid to form calcite veins.

Serp: serpentine; Spl: spinel; Idd: iddingsite; Mgt: magnetite; Cal: calcite.

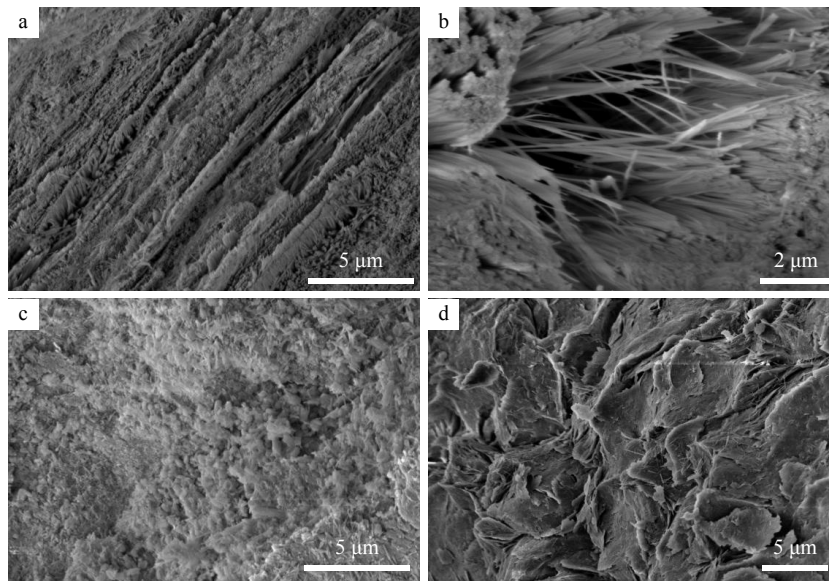


图4 不同种类蛇纹石在 SEM 下的形态照片

a: 平板状利蛇纹石, 厚度约 1~2 μm , 来自 JL213U 内层; b: 纤维状纤蛇纹石, 纤维直径约 0.2 μm , 来自 JL213U 内层; c: 短柱状多边形蛇纹石, 直径约 0.2 μm , 长度 0.4~1 μm , 来自 JL213U 内层; d: 花瓣状叶蛇纹石, 来自 JL215U 内层。

Fig.4 SEM morphological photos of different types of serpentine

a: Plate-shaped serpentine, approximately 1 to 2 μm in thickness taken from the inner layer of JL213U; b: Fibrous serpentine in diameter of approximately 0.2 μm taken from the inner layer of JL213U; c: Short columnar polygonal serpentine in diameter of approximately 0.2 μm and length of 0.4~1 μm taken from the inner layer of JL213U; d: Petal-shaped serpentine taken from the inner layer of JL215U.

纹石呈纤维圆柱状结构(图 4b), 通常纤维直径约 0.2 μm 。多边形蛇纹石主要为短柱状多边形, 直径较小约为 0.2 μm , 长度 0.4~1 μm (图 4c), 叶蛇纹石具有花瓣状结构(图 4d)。

3.4 全岩主量元素特征

蚀变橄榄岩样品的全岩主量元素组成见表 1。分析结果表明天休热液区蚀变橄榄岩具有较高的烧失量(LOI 为 12.99%~18.44%), 而按照蛇纹石矿物的化学式 $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ 计算得出, 蛇纹石矿物的含水量约为 13%^[33]。这表明本研究样品的蛇纹石化程度很高, 橄榄岩样品基本已完全发生蛇纹石化。根据烧失量变化可进一步判断 JL215U 的蚀变程度要明显高于 JL214U 和 JL213U, 三者之间的蚀变程度为 $\text{JL215U} > \text{JL213U} > \text{JL214U}$ 。

本文对主量元素进行了烧失量校正, 以减少蚀变对研究样品主量元素特征的影响。由图 5 可知, 与 Logatchev Massif 采集的 ODP Leg 209、Leg 304 和 305 以及全球深海橄榄岩样品相比, 天休热液区 JL213U 和 JL214U 的全岩组分具有低的 Al_2O_3 (分别为 0.48%、1.03%) 和 CaO (分别为 0.07%、0.14%) 含量, 其他成分均适中且含量变化较小, MgO 含量变化较小说明了样品具有较高的均一性。JL215U 全

岩地球化学成分则有明显差异, 尤其是 MgO (18.99%) 和 $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ (27.87%), 相比于 JL213U 和 JL214U 更高的 MgO 含量变化说明该样品具有不同的蚀变程度或者蚀变过程, $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3$ 组分的变化较大则可能表明 JL215U 样品后期受到不同程度含 Fe 组分的交代, 这一点和岩相学观察一致。

在以 MgO 为横坐标的二元协变图上, MgO - Na_2O 之间具有显著负相关性, 这与 Niu^[34] 所收集的全球深海橄榄岩数据趋势相一致, 海水或热液中 Na 含量高于岩石, 因此随着蚀变程度的增加, Na 由海水或热液向岩石迁移导致含量上升, 符合蚀变的规律, 但其他组分在协变图中的趋势不明显。JL213U 和 JL214U 在 MgO - SiO_2 的协变图中落在了全球深海橄榄岩的数据趋势上, 表现出一定的负相关性, 但 JL215U 的 SiO_2 含量异常低, 偏离其他样品的趋势。一般来说蛇纹石化蚀变过程中橄榄石的 Si 会以硅胶体或者离子的形式迁移到海水或热液中而丢失, 因此经历蛇纹石化蚀变过程的橄榄岩会表现出 Si 含量的减少和 Mg 含量因次生矿物的固定而增加。通过对比发现, JL215U 表现出了显著的 Si 和 Mg 丢失, 可能代表其经历了更为强烈的流体-岩石相互作用。综合岩相学和全岩主量元素结果, 我们推断 JL215U 很可能在经历还原性高温蛇

表 1 蚀变橄榄岩全岩主量元素成分分析结果												
Table 1 Chemical composition analysis of the metamorphic ultrabasic rocks												%
样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	^T Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	总计
JL213U	38.93	0.007	0.48	7.90	0.04	37.53	0.09	0.15	0.033	0.020	14.39	99.56
JL214U	38.33	0.021	1.03	8.30	0.08	38.11	0.07	0.12	0.019	0.017	12.99	99.08
JL215U	32.23	0.003	0.33	27.87	0.12	18.99	0.14	0.62	0.204	0.076	18.44	99.01

注: ^TFe₂O₃代表全铁含量。

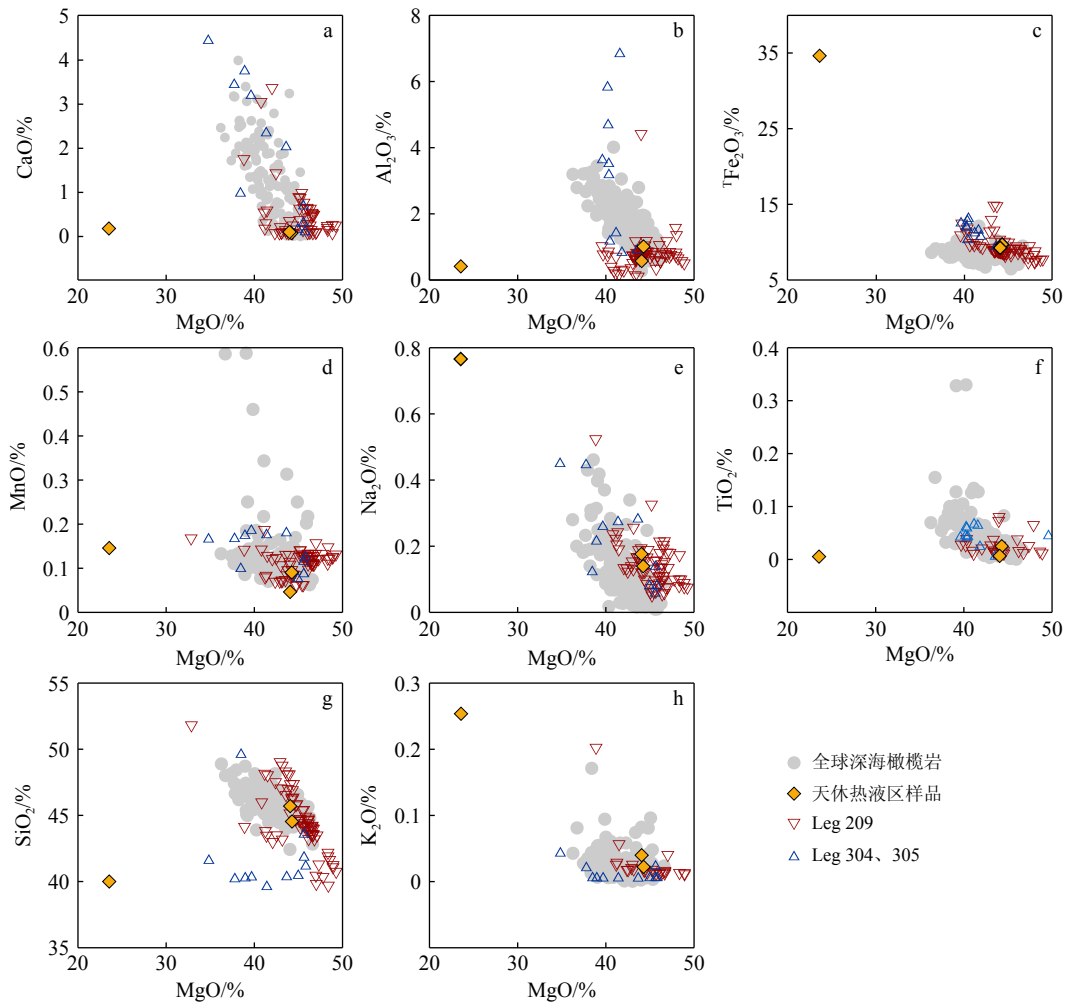


图 5 橄榄岩的主量元素相关图

天休数据为本文样品数据; ODP Leg 209(Site 1268、1270、1271、1272、1274)数据引自 Paulick 等^[35]; ODP Leg304、305 深海橄榄岩样品(Site 1309)数据引自 Delacour 等^[36], ODP Leg209、304、305 为沿着大西洋洋中脊分布的深海橄榄岩样品; 全球深海橄榄岩拖网样品数据引自 Niu^[34]。

Fig.5 The correlation of major elements in the peridotite

The Tianxiu data are the sample data for this study. The ODP Leg 209 (Sites 1268, 1270, 1271, 1272, 1274) data are taken from Paulick et al.^[35]. The data of deep-sea olivine samples from ODP Leg 304, 305 (Site 1309) are taken from Delacour et al.^[36]. ODP Leg 209, 304, 305 are deep-sea olivine samples distributed along the Mid-Atlantic Ridge. The global deep-sea olivine trawl sample (Global trend) data are taken from Niu^[34].

纹石化之后, 进一步发生了氧化性低温热液蚀变, 导致 Mg、Si 大量流失以及 Fe 含量急剧上升。

3.5 矿物主量元素地球化学特征

为进一步解析样品的蚀变演化过程, 利用电子

探针对 JL213U、JL214U 与 JL215U 的矿物主量元素成分进行分析, 结果如表 2、图 6 所示。三个样品点位分布呈现出两种截然不同的趋势, 代表了不同的蚀变类型与演化过程。

前人在天休和西南印度洋中脊(SWIR)采集的

橄榄岩样品表现出高 MgO、低 FeO 的特征(图 6a), 表明其经历了高度蛇纹石化^[25,37]。然而, 如图 6b 所示, 天体和 SWIR 样品中部分岩石的 CaO 高达约 20%, 主要形成碳酸盐矿物, 表明其经历了后期显著的富 Ca 流体的交代作用^[21,34]。JL213U 与 JL214U 样品点集中分布于 MgO 含量高(约 38%~42%)、FeO 含量低(约 1%~3%)的区域(图 6a), 其 CaO 含量也极低(<1%), 与天体和 SWIR 多数高度蛇纹石化点位重合(图 6b)。这种元素组合反映其矿物组分以镁为主, 铁和钙均已在蚀变过程中大量迁移并富集于次生矿物(如铁主要富集于磁铁矿或钙主要富集于碳酸盐)中, 说明原始橄榄石已经发生了较完全的蛇纹石化, 形成了高镁型蛇纹石, 代表了低水/岩比、封闭体系下的脱铁型蛇纹石化演化路径。JL215U 显示出明显不同的地球化学变化趋势, FeO 含量明显升高(最高可达约 18%)(图 6a), 而 MgO 含量明显偏低(约 10%~30%)(图 6b)。单一蛇纹石化过程难以解释该特征, 结合岩相学与前人研究, 推测这一趋势是由于在早期不完全蛇纹石化基础上后期叠加了伊丁石化作用导致的。

伊丁石是橄榄石在低温氧化-水化条件下形成的混合物, 通常富含 FeO、Al₂O₃ 及水合矿物(如黏土矿物、赤铁矿等), 而 MgO 含量显著降低^[38]。该过程会导致 FeO 富集(氧化态铁未被迁出), MgO 被

进一步稀释或流失, CaO 和 Al₂O₃ 有时因交代作用而略有上升^[38]。因此, JL215U 的特征应归因于伊丁石化与残余蛇纹石化共存的复合蚀变过程, 反映了较开放系统条件、氧化环境及可能的次生热液流体改造。

此外, 样品在 SiO₂-FeO-MgO 三元图上的分布也揭示出两类截然不同的蚀变演化趋势, 反映了矿物在成岩-蚀变过程中所经历的差异化地球化学成分演变路径(图 6c)。样品 JL213U 与 JL214U 在 SiO₂-FeO-MgO 三元图中主要集中于高 MgO(约 45%~52%)、低 FeO(<8%)、SiO₂ 稳定分布区, 明显处于蛇纹石稳定域内(叶蛇纹石和纤蛇纹石)。这类元素组合反映了以橄榄石为主的原岩在相对封闭系统条件下发生水化作用, Mg 得以富集而 Fe 发生一定程度迁出, 典型产物为富镁的蛇纹石类矿物。因此, 该类样品可视为典型的蛇纹石化产物, 记录了较低氧化性、流体封闭性的水-岩反应过程。而样品 JL215U 在 SiO₂-FeO-MgO 三元图中富 FeO 和 SiO₂、贫 MgO, 逐步脱离蛇纹石域, 向富铁-富硅端元演化。这种成分组合表明, 该类样品除早期蛇纹石化作用外, 还叠加发生了新的热液蚀变, Fe 得以富集。结合手标本上样品表面呈现的红色氧化层特征和显微镜下观察到的伊丁石(图 3b)以及原位探针数据的主量元素成分含量, 比如

表 2 蚀变橄榄岩代表性矿物主量元素组成
Table 2 Major element composition of representative minerals in altered peridotite %

矿物样品	Atg		Ctl		Spl		Mgt		Chl		Idd	
	JL213U	JL214U	JL213U	JL214U	JL213U	JL214U	JL213U	JL214U	JL213U	JL214U	JL215U	JL215U
SiO ₂	36.9	37.3	43.1	42.8	0.010	0.057	2.22	1.61	30.9	32.0	33.3	33.8
TiO ₂	0.069	0	0.060	0.058	0.176	0.397	0.026	0.101	0.011	0.115	0	0.006
Al ₂ O ₃	1.29	1.33	0.246	0.154	34.6	11.7	0.057	0.016	16.6	15.3	12.1	0.358
K ₂ O	0.007	0.030	0.011	0	0.04	0.018	0.005	0	0.057	0.018	0.033	0.230
P ₂ O ₅	0	0	0.009	0.063	0	0	0	0.023	0.036	0	0.052	0.624
MnO	0.013	0.085	0.033	0	0.155	0.553	0.045	0.065	0.025	0	0.092	0.037
FeO	3.72	3.20	3.67	1.43	14.1	32.0	88.2	89.1	2.79	3.04	11.4	36.7
MgO	33.1	35.3	39.9	42.6	15.6	5.15	2.46	1.9	33.0	33.9	28.9	18.4
Cr ₂ O ₃	1.07	0	0.013	0.011	33.8	48.6	0.038	0.080	1.52	1.24	0.076	0.012
CaO	0.002	0.161	0.058	0	0.003	0	0	0	0.028	0.027	0.063	0.892
Na ₂ O	0.108	0.059	0	0	0.006	0.035	0.020	0.004	0.023	0.014	0.068	0.133
NiO	0.153	0.101	0.229	0.391	0.179	0.037	0.146	0.211	0.218	0.234	0.007	0.035
总计	76.5	77.5	87.3	87.6	98.7	98.6	93.2	93.2	85.2	85.9	86.1	91.2

注: Atg: 叶蛇纹石; Ctl: 纤蛇纹石; Spl: 尖晶石; Mgt: 磁铁矿; Chl: 绿泥石; Idd: 伊丁石。

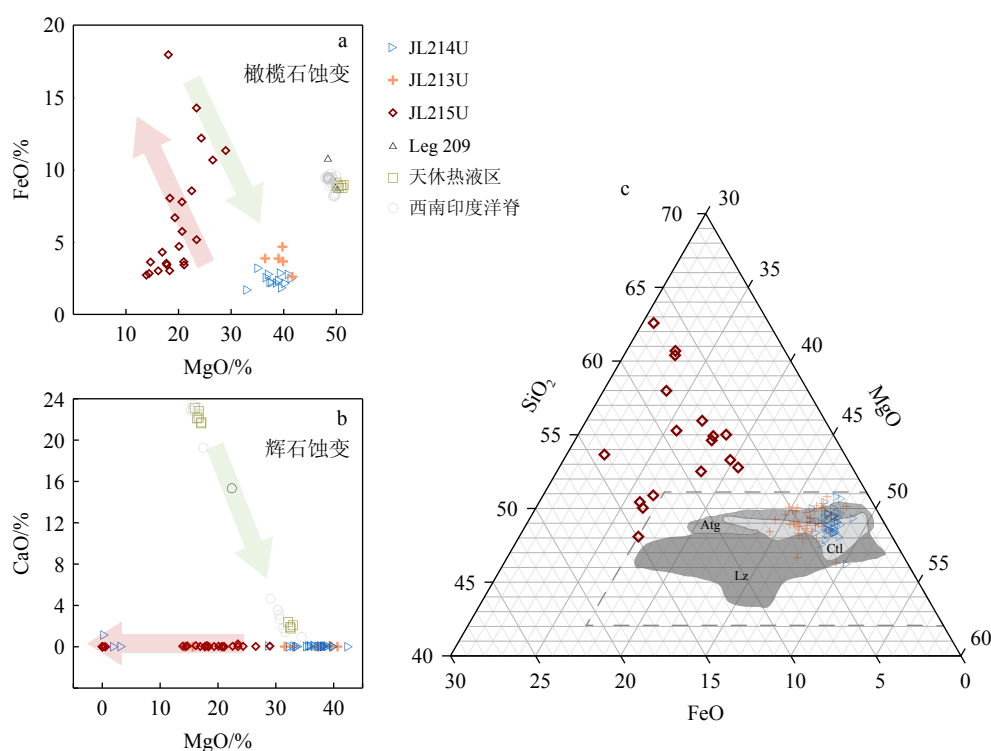


图 6 橄榄石蚀变 MgO-FeO、辉石蚀变 MgO-CaO 协变图以及蛇纹石族矿物 SiO₂-FeO-MgO 三元图^[39]

红色箭头指示伊丁石化方向, 绿色箭头指示蛇纹石化方向。Atg: 叶蛇纹石区, Ctl: 纤蛇纹石区, Lz: 利蛇纹石区。

Fig.6 The covariation of olivine alteration MgO-FeO and pyroxene alteration MgO-CaO, and the SiO₂-FeO-MgO ternary diagram for serpentine group minerals^[39]

The red arrow indicates the direction of the iddingsitization, the green arrow indicates the direction of serpentinization. Atg: antigorite area, Ctl: chrysotile area, Lz: lizardite Area.

SiO₂ (33.8%~43.4%)、FeO (19.6%~36.7%) 和 MgO (15.6%~20.6%)^[38], 可确定 JL215U 样品经历了蛇纹石化叠加伊丁石化的过程, 原始矿物为橄榄石, 蚀变后形成了赤铁矿、伊丁石或富铁黏土类的次生矿物。这一过程通常发生于较开放系统条件下, 受氧化性热液或海水交互作用影响。

4 讨论

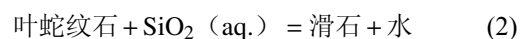
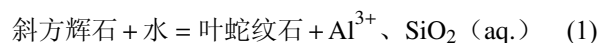
4.1 天休热液区橄榄岩的蚀变分期

结合前人的研究认识, 综合考虑温度、矿物组合、元素成分特征等一系列条件, 本研究对天休热液区的橄榄岩蚀变过程进行重建。根据研究样品中出现的矿物组合对应前人对蛇纹石化和伊丁石化温度的研究认识^[37-38], 本文选择两个明显的温度界线将研究区橄榄岩的蚀变过程分为 3 个阶段:

阶段 I: 高温初期蛇纹石化 ($T > 350 \sim 400$ °C, 深度 $> 4 \sim 6$ km)

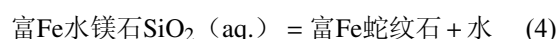
该阶段反映深部封闭体系中蛇纹石化的初始

演化过程^[6], 流体渗透较有限, 蛇纹石化程度较低 ($< 15\%$)。此时橄榄石相对稳定, 辉石因自由能变化 (ΔG) 较橄榄石更有利于反应^[40], 故辉石蚀变占主导。辉石通过裂隙或断裂与下渗的海水发生蚀变, 生成叶蛇纹石、滑石和透闪石, 伴随少量绿泥石生成。主要化学反应如下:



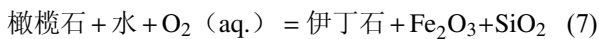
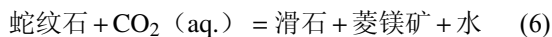
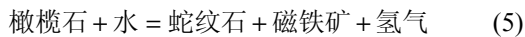
阶段 II: 中温发展期蛇纹石化 (T 约为 $200 \sim 350$ °C, 深度约 $2 \sim 4$ km)

该阶段也为封闭的体系, 此时橄榄石失稳, 其蚀变占主导, 蚀变速率大于辉石, 蛇纹石化程度达到 $40\% \sim 50\%$ ^[9]。蛇纹石则以纤蛇纹石和利蛇纹石为主, 并形成富铁的蛇纹石和富铁的水镁石, 蛇纹石以纤蛇纹石和利蛇纹石为主^[9]。但样品并未发现有水镁石的出现, 很可能是由于辉石蚀变释放的 SiO₂ 促进了水镁石的消耗^[4]。主要反应包括:



阶段Ⅲ：低温晚期蛇纹石化与伊丁石化叠加 ($T < 150 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 深度 $< 2\text{ km}$)

该阶段温度较低,体系较开放,残余的橄榄石被蛇纹石广泛替代,辉石低温蚀变,蛇纹石化程度大于 $60\% \sim 70\%$ ^[41]。水岩比例高,网络结构有大量的磁铁矿生成^[10],形成多边形蛇纹石脉。流体进入岩石中反应沉淀,在裂隙处形成各种脉体(主要为碳酸盐脉)。在富含 H_2O 、 CO_2 等组分的流体作用下,溶液中呈离子状态的 CO_2 具有较强的活泼性,原生矿石和围岩中的硅酸盐矿物在 CO_2 的作用下受到广泛的热液交代作用发生蛇纹石的碳酸盐化,其反应过程可表示为式(6)。橄榄石在氧化富水环境下发生伊丁石化,生成富 Fe、贫 Mg 的伊丁石及铁氧化物。主要反应包括:



4.2 热液背景下封闭至开放体系转化对蚀变机制的影响

本研究对天休热液区橄榄岩样品的岩石学与地球化学特征开展了系统分析,识别出两个阶段的蚀变演化过程:(Ⅰ)橄榄石与辉石在封闭系统下发生典型脱铁型蛇纹石化(见于 JL213U、JL214U、JL215U);(Ⅱ)在相对开放且氧化性环境下,橄榄石进一步发生伊丁石化作用,主要出现在 JL215U 样品中。整体而言,该蚀变演化过程揭示了热液流体条件对蚀变机制的显著影响。

在封闭系统下,蛇纹石化通常以橄榄石与辉石的脱铁反应为主,产出富 Mg 的蛇纹石、水镁石及磁铁矿,对应的全岩地球化学特征表现为 Mg/Fe 比升高和 Fe 含量下降^[10]。然而,随着反应体系向开放状态演化(例如受热液通道活动增强、渗透性提升或外源氧化性海水混入等因素影响),原先的还原性条件被打破,流体的氧化还原状态及化学组成发生显著变化,进而导致蚀变机制发生转变^[42]。该转变过程可被视为蛇纹石化向伊丁石化的过渡,其特征主要体现在以下几个方面:①矿物组合上,原始橄榄石经由蛇纹石化后,其残余或边界区域逐渐被伊丁石、赤铁矿、针铁矿等氧化产物所替代,反映出蚀变环境由还原性向氧化性演化的趋势;②化学组成上,表现为 Mg 含量下降、Fe 含量升高,反映了系统开放化及氧化性增强条件下铁元素的沉淀形式与分布特征发生改变;③显微结构方面,伊丁石

多沿蛇纹石裂隙或边界分布,呈交代结构,表明其为在橄榄石原位基础上受氧化性流体进一步改造形成的次生矿物组合^[43]。值得注意的是,蛇纹石化与伊丁石化之间并非完全割裂,而是受控于热液体系空间结构、水-岩比及氧化还原状态演化的连续响应过程。本文通过对 JL215U 样品的研究,揭示了从相对封闭还原系统向开放氧化系统演化所驱动的矿物转化路径及其成因机制。

天休热液区深海橄榄岩的两阶段蚀变演化模式与经典的蛇纹石化-氧化改造模式较为一致^[10,44],但进一步强调了热液体系空间分布与流体性质变化对蚀变机制的影响。JL215U 样品所表现出的贫 Mg 富 Fe 特征,与前人报道的氧化-铁富集环境下的深海橄榄岩特征相吻合^[38]。然而,不同于以往强调“晚期热液流体氧化性增强”所驱动的解释^[42],本研究认为 JL215U 的氧化特征更可能源自其在空间上远离热液喷口、受还原性热液流体影响减弱这一位置控制的成因机制。在远离热液喷口的部位,如 JL215U 所处的采样位置,若水-岩比降低、局部渗透性增强或与外源氧化性海水混合增加,则可能形成更具氧化性的环境,从而促进橄榄石伊丁石化及氧化铁的富集沉淀^[43]。伊丁石化过程还受多重因素协同控制,包括流体的化学组成(如富含 H_2O 、 CO_2 、Cl⁻等挥发组分)有助于增强流体活性,促进橄榄石的蚀变反应^[45];pH 值通常处于弱酸性至中性范围,有利于硅、铝、铁等元素的迁移与重组;橄榄石本身的 Fe 含量也显著影响其蚀变倾向,高 Fe 含量更易发生伊丁石化;结构上的裂隙或微孔隙网络则显著提高流体渗透性与反应界面,增强了蚀变深度与广度^[45];在动力学层面,反应持续时间、晶界扩散速率以及流体-矿物之间的反应动力学均对最终的伊丁石形态、组合特征及空间分布产生显著影响^[19]。本研究 JL215U 样品可能正是在这些因素综合影响下经历了更长时间、更大程度的低温氧化性流体渗透改造,而氧化还原状态的改变,特别是氧化性增强所导致的 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 转化,是伊丁石类矿物形成的关键驱动^[19-20]。这促使橄榄石进一步发生伊丁石化作用,形成赤铁矿、伊丁石等次生产物,因而整体表现出更高的蚀变程度。相比之下, JL213U 和 JL214U 更靠近高温热液喷口,保留了更多早期还原性热液作用下形成的矿物组合,后期氧化性流体渗透作用较弱,故蚀变程度相对较低。

本研究进一步指出,热液流体不仅是驱动橄榄岩蚀变反应的必要介质,其性质变化也是决定蚀变路径与矿物组合演化的关键控制因素。封闭至开

放体系的转化, 实质上体现了温度梯度、水-岩比及局部氧化还原状态的动态调整, 其所造成的反应空间与物质迁移条件的变化, 直接决定了橄榄岩由蛇纹石化向伊丁石化的演化趋势。

综上, 本研究基于天休热液区典型橄榄岩样品, 细化了海底环境中由封闭向开放系统过渡的多阶段水-岩反应过程, 强调了区域热液体系空间结构与流体通道分布对矿物类型、蚀变机制与元素循环行为的影响。

5 结论

(1) 天休热液区深海橄榄岩经历了较高级别的蚀变, 少见新鲜的原生矿物残余, 橄榄石和辉石蚀变为蛇纹石类矿物(主要为纤蛇纹石和叶蛇纹石), 并伴有磁铁矿和方解石等次生矿物。全岩地球化学成分分析表明, JL213U 和 JL214U 样品成分均一, 显示出典型的深海橄榄岩蛇纹石化特征; JL215U 样品的 MgO 和 $^*\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量明显异常, 反映出其经历了伊丁石化蚀变作用的叠加。

(2) 天休热液区深海橄榄岩样品的矿物成分差异较大, 识别出两类截然不同的蚀变演化路径: JL213U 与 JL214U 表现为在封闭系统下形成的富 Mg、贫 Fe 蛇纹石化特征, 反映了橄榄石的脱铁型水-岩反应过程; 而 JL215U 则表现出 Fe 富集与 Mg、Si 稀释, 指示其在早期蛇纹石化基础上叠加了开放系统下的伊丁石化作用。整体而言, 该分异揭示了热液流体条件对蚀变机制的显著影响, 有助于深化对研究区矿物演化过程的理解。天休热液区深海橄榄岩记录了多期次蚀变过程, 表现为由高温高压下辉石的蛇纹石化开始, 继而橄榄石蚀变形成富铁蛇纹石和水镁石, 并伴随中-晚期磁铁矿的广泛产出, 最终在晚期氧化环境中形成赤铁矿和伊丁石类矿物, 整体反映出封闭还原向开放氧化条件的水岩反应机制变化, 突出流体成分和氧化还原状态对矿物组合演化和元素迁移的关键影响。

(3) 本研究不仅揭示了天休热液区深海橄榄岩蛇纹石化向伊丁石化的转化过程, 丰富了对两者演化机制的认识, 还重点阐明了水-岩反应过程中流体氧化还原状态和成分变化对矿物组合及铁元素迁移的调控作用, 体现了热液流体与岩石间复杂的物质交换与相互影响。该研究为解析洋中脊热液系统中岩石-流体-元素三者耦合演化机制提供了重要依据, 对全球地球化学循环和深部元素转化过程的认识具有积极促进作用。

致谢: 感谢审稿专家提出了建设性的审稿意见。感谢中国大洋 72 航次全体科考队员和船员对航次的支持, 感谢“蛟龙号”潜航员和保障团队对深潜采样的支持。感谢钱生平、张灵敏、周颖、李赛宇和沈阳在前期样品处理和测试方面提供的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Steinhorsdottir K, Dipple G M, Cutts J A, et al. Formation and preservation of brucite and awaruite in serpentinized and tectonized mantle in Central British Columbia: implications for carbon mineralization and nickel mining[J]. *Journal of Petrology*, 2022, 63(11): egac100.
- [2] Pineda-Rodríguez N A, Zuluaga C A, Bernet M, et al. Petrology of serpentinites associated to the Romeral Suture Zone in the Central Cordillera (Colombia)[M]//Gomez J, Zuluaga CA, Bernet M. New Insights into the Colombian Andes: Magmatism, Metamorphism and Exhumation. Geological Society, London, Special Publications, 2025, 558(1): 31-52.
- [3] Evans K A, Powell R, Frost B R. Using equilibrium thermodynamics in the study of metasomatic alteration, illustrated by an application to serpentinites[J]. *Lithos*, 2013, 168-169: 67-84.
- [4] Mével C. Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2003, 335(10-11): 825-852.
- [5] Kelley D S, Karson J A, Blackman D K, et al. An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30°N[J]. *Nature*, 2001, 412(6843): 145-149.
- [6] Tsuchiya J, Mizoguchi T, Inoué S, et al. First-principles investigations of antigorite polysomatism under pressure[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, 129(6): e2023JB028060.
- [7] Ding T, Dias Á A, Wang J, et al. Serpentinization and its implications for ultramafic-hosted sulfide mineralization: a case study at the Tianzuo hydrothermal field, 63.5°E, Southwest Indian Ridge[J]. *Marine Geology*, 2023, 455: 106969.
- [8] McCafferty A E, Van Gosen B S. Airborne gamma-ray and magnetic anomaly signatures of serpentinite in relation to soil geochemistry, Northern California[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(8): 1524-1537.
- [9] Bach W, Garrido C J, Paulick H, et al. Seawater-peridotite interactions: First insights from ODP Leg 209, MAR 15°N[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2004, 5(9): Q09F26.
- [10] Qi L, Allerton S, Muxworthy A R, et al. Remagnetization of serpentinite during deformation: evidence from a fossil oceanic transform fault zone of the Troodos Ophiolite[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2025, 130(4): e2024JB030790.
- [11] Newman S A, Lincoln S A, O'Reilly S, et al. Lipid biomarker record of the serpentinite-hosted ecosystem of the Samail Ophiolite, Oman and implications for the search for biosignatures on Mars[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(7): 830-845.
- [12] Putman L I, Sabuda M C, Brazelton W J, et al. Microbial communities in a serpentinizing aquifer are assembled through strong concurrent dispersal limitation and selection[J]. *mSystems*, 2021, 6(5):

- e0030021.
- [13] Boyd E S, Colman D R, Templeton A S. Perspective: microbial hydrogen metabolism in rock-hosted ecosystems[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2024, 12: 1340410.
- [14] Ruff S E, De Angelis I H, Mullis M, et al. A global comparison of surface and subsurface microbiomes reveals large-scale biodiversity gradients, and a marine-terrestrial divide[J]. *Science Advances*, 2024, 10(51): eadq0645.
- [15] Patterson S N, Lynn K J, Prigent C, et al. High temperature hydrothermal alteration and amphibole formation in Gakkel Ridge abyssal peridotites[J]. *Lithos*, 2021, 392-393: 106107.
- [16] Alt J C, Shanks III W C. Serpentinization of abyssal peridotites from the MARK area, Mid-Atlantic Ridge: sulfur geochemistry and reaction modeling[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(4): 641-653.
- [17] Albers E, Behrendt N, Diehl A, et al. Formation and hydrothermal alteration of a volcanic center: melt pooling and mass transfers at Langeseth Ridge (Gakkel Ridge, Arctic Ocean)[J]. *Marine Geology*, 2024, 475: 107347.
- [18] Chan L H, Edmond J M, Thompson G, et al. Lithium isotopic composition of submarine basalts: implications for the lithium cycle in the oceans[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 108(1-3): 151-160.
- [19] Megevand V, Viennet J C, Le Guillou C, et al. Tardi-magmatic iddingsite in the Martian Nakhilite NWA 817[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2025, 393: 318-333.
- [20] Sheppard R A. Iddingsitization and recurrent crystallization of olivine in basalts from the Simcoe mountains, Washington[J]. *American Journal of Science*, 1962, 260(1): 67-74.
- [21] Velbel M A. Dissolution of olivine during natural weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(20): 6098-6113.
- [22] Schrenk M O, Brazelton W J, Lang S Q. Serpentinization, carbon, and deep life[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2013, 75(1): 575-606.
- [23] Kitadai N, Maruyama S. Origins of building blocks of life: a review[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(4): 1117-1153.
- [24] 吴雪婷. 卡尔斯伯格脊典型热液区流体地球化学时空演化特征研究 [D]. 浙江大学博士学位论文, 2022. [WU Xueting. Research on the spatio-temporal evolution characteristics of fluid geochemistry in the typical hydrothermal area of the Carlsberg Ridge[D]. Doctor Dissertation of Zhejiang University, 2022.]
- [25] 陈阳. 西北印度洋卡尔斯伯格脊天休热液区深海橄榄岩蚀变和元素迁移特征及过程研究 [D]. 浙江大学博士学位论文. 2019. [CHEN Yang. Characteristics and processes of alteration and element migration of abyssal peridotite at the Tianxiu hydrothermal field on the Carlsberg Ridge, Northwest Indian Ocean[D]. Doctor Dissertation of Zhejiang University, 2019.]
- [26] 颜炜, 谭文睿, 韩喜球, 等. 卡尔斯伯格脊天休洋脊段的深部岩浆过程: 来自洋中脊玄武岩中单斜辉石结晶条件的约束 [J]. *岩石学报*, 2024, 40(7): 2203-2214. [JIE Wei, TAN Wenrui, HAN Xiqiu, et al. Magmatic processes in the depth of Tianxiu segment, Carlsberg Ridge: implication from crystallization conditions of clinopyroxene in MORB[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40(7): 2203-2214.]
- [27] Zhou P, Han X Q, Wang Y J, et al. Hydrothermal alteration of basalts in the ultramafic-associated Tianxiu Vent Field, Carlsberg Ridge[J]. *Marine Geology*, 2023, 463: 107113.
- [28] Hu H, Yu X, Han X Q, et al. Magma evolution along detachment fault-affected ridge segments: petrology and geochemistry of MORBs from the Tianxiu segment, Carlsberg Ridge[J]. *Lithos*, 2025, 494-495: 107917.
- [29] Yi S B, Oh C W, Pak S J, et al. Geochemistry and petrogenesis of mafic-ultramafic rocks from the Central Indian Ridge, latitude 8°-17°S: denudation of mantle harzburgites and gabbroic rocks and compositional variation of basalts[J]. *International Geology Review*, 2014, 56(14): 1691-1719.
- [30] Mukhopadhyay R, Iyer S D, Ray D, et al. Morphotectonic and petrological variations along the southern Central Indian Ridge[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2016, 105(3): 905-920.
- [31] 余星, 初凤友, 董彦辉, 等. 拆离断层与大洋核杂岩: 一种新的海底扩张模式 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2013, 38(5): 995-1004. [YU Xing, CHU Fengyou, DONG Yanhui, et al. Detachment fault and oceanic core complex: a new model of seafloor spreading[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(5): 995-1004.]
- [32] Andreani M, Baronnet A, Boullier A M, et al. A microstructural study of a "crack seal" type serpentine vein using SEM and TEM techniques[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2004, 16(4): 585-595.
- [33] 龙雄志. 内蒙古贺根山蛇绿岩形成构造环境与流体来源研究 [D]. 中国科学院广州地球化学研究所硕士学位论文, 2016: 20-35. [LONG Xiongzh. Research on the tectonic setting and fluid origin for serpentinization of the Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia[D]. Master Dissertation of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2016: 20-35.]
- [34] Niu Y L. Bulk-rock Major and trace element compositions of abyssal peridotites: implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath Mid-Ocean Ridges[J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(12): 2423-2458.
- [35] Paulick H, Bach W, Godard M, et al. Geochemistry of abyssal peridotites (Mid-Atlantic Ridge, 15°20'N, ODP Leg 209): implications for fluid/rock interaction in slow spreading environments[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234(3-4): 179-210.
- [36] Delacour A, Früh-Green G L, Frank M, et al. Sr- and Nd-isotope geochemistry of the Atlantis Massif (30°N, MAR): implications for fluid fluxes and lithospheric heterogeneity[J]. *Chemical Geology*, 2008, 254(1-2): 19-35.
- [37] 马强. 西南印度洋超基性岩蛇纹石化矿物地球化学及其磁化率研究 [D]. 同济大学硕士学位论文, 2015. [MA Qiang. Study on the mineral geochemistry and magnetic susceptibility of serpentinization in ultrabasic rocks in the Southwest Indian Ocean[D]. Master Dissertation of Tongji University, 2015.]
- [38] 彭慧中. 山东蓬莱玄武岩中橄榄石伊丁石化特征及其成因 [D]. 中国地质大学 (北京) 硕士学位论文, 2021. [PENG Huizhong. Characteristics and genesis of iddingsite alteration from Penglai basalt, Shandong[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences

- (Beijing), 2021.]
- [39] Wicks F J, Plant A G. Electron-microprobe and X-ray microbeam studies of serpentine textures[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1979, 17(4): 785-830.
- [40] Allen D E, Seyfried Jr W E. Compositional controls on vent fluids from ultramafic-hosted hydrothermal systems at mid-ocean ridges: an experimental study at 400 °C, 500 bars[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(8): 1531-1542.
- [41] Andreani M, Muñoz M, Marcaillou C, et al. μ XANES study of iron redox state in serpentine during oceanic serpentinization[J]. *Lithos*, 2013, 178: 70-83.
- [42] Rouméjon S, Cannat M, Agrinier P, et al. Serpentinization and fluid pathways in tectonically exhumed peridotites from the Southwest Indian Ridge (62-65°E)[J]. *Journal of Petrology*, 2015, 56(4): 703-734.
- [43] Fauguerolles C, Castelain T, Villeneuve J, et al. H₂ mobility and redox control in open vs. closed hydrothermal oceanic systems-evidence from serpentinization experiments[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2024, 36(4): 555-579.
- [44] Klein F, Bach W, McCollom T M. Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks[J]. *Lithos*, 2013, 178: 55-69.
- [45] Lee M R, Daly L, Cohen B E, et al. Aqueous alteration of the Martian meteorite Northwest Africa 817: probing fluid-rock interaction at the Nakhilite launch site[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2018, 53(11): 2395-2412.